

고리원자력본부 제2발전소 3호기 습분분리재열기 성능개선

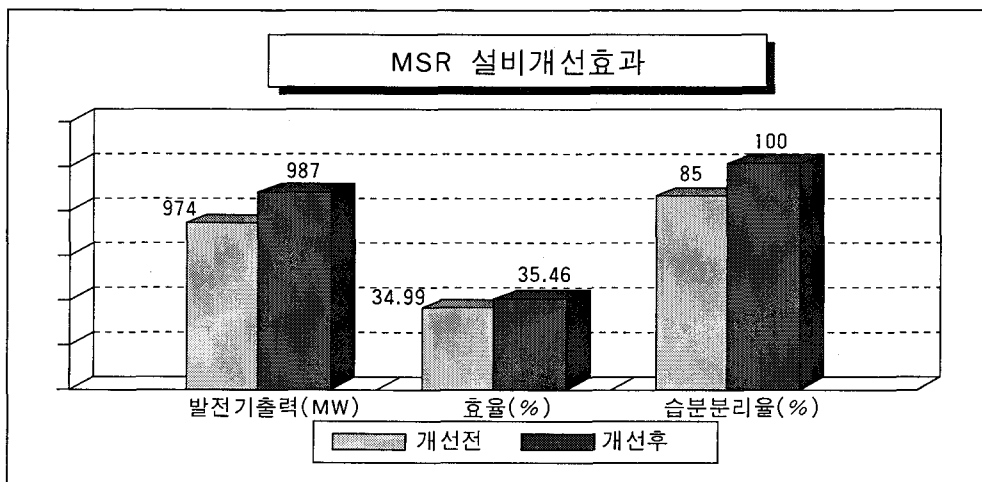
한국전력공사에서는 에너지이용 합리화를 통한 에너지소비와 환경오염 감소로 경영개선과 국가경쟁력 향상에 기여하기 위해 매년 「에너지관리 우수 사례 발표회」를 개최하고 있다. 금년도 4월 26일 열린 제18회 사례발표회에서 입상한 발표문 내용을 게재한다.

1. 개요

가. 고리 3, 4호기의 발전기 출력은 '85.9. 인수성능 시험시 987.5 MWe에서 '96.6. 성능 시험시 974.8MWe로 측정되어, 상업운전후 10년 동안 14MWe까지 출력이 저하된 바, 출력결손의 원인규명 및 복구를 위해 복수기 튜브점검 정비, 각종 열교환기 점검, 보온 취약개소 보완 등의 노력을 경주하여 왔으나, 근본적인 조치가 되지 못하였다.

나. 습분분리 재열기(MSR)의 성능저하가

주된 원인으로 보고 사내외 전문인력으로 진단팀을 구성하여, 간이성능시험 결과를 검토하고 전산프로그램(NOPAS)을 사용하여 MSR 성능평가를 하는 한편, '94.4월 계획예방정비 기간중 정밀 설비진단 결과, 재열기 및 습분분리기 성능이 심하게 저하되어 있고, MSR내부의 우회증기량(By-pass)및 습분재유입(Carry-over)현상이 과다하며, MSR 내부부품도 현저히 침식되어 있고, 경년열화 되어 터빈의 주요부품 칩, 부식이 가속화 되고 에너지 손실이 커서 MSR 설비를 전반적으로 교체할 필요가 있는 것으로 판단되었다.



다. '95.7~9. 3호기 계획예방정비 기간중 MSR 내부장치(습분분리기 및 재열기)를 개선된 형식으로 교체후 성능검사 결과 재열기 성능, 습분분리 효율이 크게 개선되고 증기 과열도가 향상 되었을 뿐만 아니라 발전기 출력이 13MWe, 발전소 순효율이 약0.474% 증가되어 발전소 인수성능시험시의 수준으로 복구되어 에너지 절감 효과가 뛰어난 것으로 입증되었다.

2. 현상파악 및 분석

가. 설비기능 및 구조

(1) 설비기능

- 증기발생기에서 생성된 포화증기(건도 99.98%, 65kg/cm², 280℃)는 고압터빈을 회전시키고 팽창되면서 압력 및 온도가 강화(12kg/cm², 190℃, 습분 12.8%)되어 고압터빈에서 배기되며
- 고압터빈 배기증기는 2개의 주증기 배관을 통해, 습분분리 재열기(MSR)로 들어가 습분이 분리되고 다시 가열되어 과열증기가 되어 (12kg/cm², 265℃)저압터빈으로 들어감.
- 저압터빈에서 팽창되면서 저압터빈 로타를 회전시킨 주증기는 (습분13%) 복수기에서 응축되어 증기발생기로 재순환됨.

(2) 구성 및 제작

- MSR 수량 : 2대(호기당)
- MSR 1대당 구성기기
 - 습분분리장치 : 1대
 - 재열기 : 4대(고압/저압재열기 각2대)
 - 기타 : 유량분배장치, 열차폐판, 관련 배관
- 기기공급 : 영국 GEC 사
- 기기설계 : 프랑스 스테인사
- 제작 : 현대중공업(주)
- 발전소 상업운전 : 3호기-'85.9, 4호기-'86.4

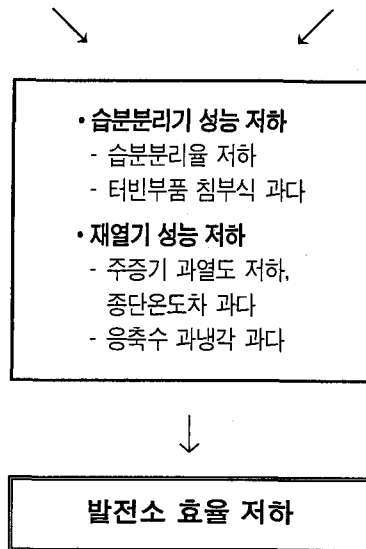
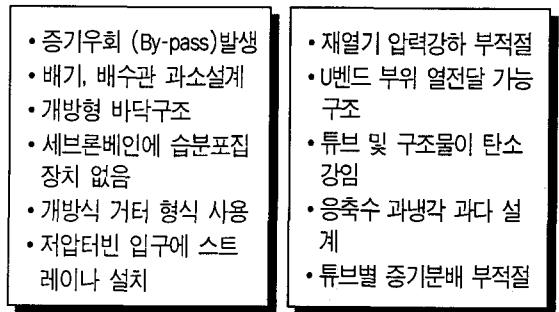
나. 설비운영상 문제점 분석

(1) MSR 종합 성능저하

습분분리효율, 중단온도차, 증기과열도, 열전달부하 등이 모두 설계값보다 낮음

항 목	설계값	측정값	비 고
습분분리효율(%)	99.96	85~87	
중단온도차(°F)	27	30~34	
열전달부하(MWt)	194.75	130.57	
증기과열도(Btu/hr)	76.5	39.1	1단재열기 기준
압력강하(Psi)	12	7~9	

(2) 구조적 결함



3. 추진내용

가. 추진경위

- '94.4 합동 정밀점검팀 구성 및 점검
- '94.7 MSR 내장품 설비개선 검토보고 및 설비 구매요청(대 본사)
- '94.9 MSR 설비개선계획 품의(사장)
- '94.10 구매규격서(P.O) 작성 및 본사승부
- '94.12 주기기 구매계약 체결 (98억, 미국 SENIOR사)
- '95.8~11 3호기 MSR 내장품 교체공사 및 성능시험
- '96.4~6 4호기 MSR 내장품 교체공사중

나. MSR 개선을 위한 기술검토

(1) MSR 정밀점검팀 구성 및 점검

- 점검팀 구성 : 고리 제2발전소, 기술연구원, 정비기획실, 기기공급사
- 점검일시 : '94.4~7
- 점검 검토내용
 - 발전소 간이성능검사 결과분석
 - 원전성능분석 전산프로그램(NOPAS)을 이용한 MSR 성능분석
- MSR 내부 상태 정밀점검(계획예방정비 기간중)
- 성능상, 구조적 문제점 및 개선방안 검토
- 점검결과 분석, 종합 및 성능개선 요청

(2) 점검 및 기술검토 내용

(가) 습분분리(Moisture Separator)장치

- 문제점
 - 습분포집장치(Pocket)가 없어 분리된 습분이 재유입 되는 구조임
 - 증기 유속 균일화 분배장치가 없음
 - 세브론베인에 유입되는 증기속도가 설계속도(8fpm)이상시 습분분리효율이 저하됨
 - 세브론베인의 전단 습분분리장치가 없어

습분분리효율 낮음

- 습분배수장치가 개방형으로 제작되어 습분이 Carry-Over되는 구조

• 개선방안

- 이중 습분포집(Double Pocket)구조의 세브론 베인으로 변경
 - 포켓내부에 약간의 부압형성으로 습분분리율 증가
 - 포켓을 통해 분리된 습분이 배수 되도록 하여 증가와 배수의 혼합 방지
 - 세브론베인에 유입되는 증기속도 균일화 장치 설치
 - 유량분배장치 이중화 설치
 - MSR내 각 위치별 증기의 全壓(動壓+定壓)을 고려하여 슬롯트 형상 및 개구부 단면적을 다르게 선정)
 - 위치별로 직경이 다르게 다공판 제작 설치
- 모델 제작 및 성능시험으로 습분분리 효율 사전확인
 - 밀폐식의 배수장치 채택
 - Carry-Over 방지

(나) 재열장치(Reheater)

- 문제점
 - 응축수 배수계통 동요(Hunting)으로 관련 계통 불안정 운전
 - 재열기 튜브 및 배수계통 배관에 주기적인 과대압력, 온도 작용으로 피로현상 증가
 - 동요현상 최소화를 위해 과잉증기(Excess Steam)량을 증가시키기 위해 오리피스 구경확대→에너지손실 증가 및 발전소 효율저하
 - 재열기 성능 저하
 - 응축수 과냉각도 과다
 - 재열기 종단온도차 과다(설계 27°F , 운전값 34 °F)
 - 재열기 열전달 부하 저하(설계 194MWt, 운전값 130MWt)
 - 재열기 튜브등 주요부품 재질이 탄소강임
 - Tube Sheet 및 Support Plate 부위 녹발생 및 이물질 축적→운전중 튜브 파단시 장기

간 발전증지 불가피

- 증기의 우회누설(By-Pass) 발생구조
 - 튜브와 튜브보호관 사이 및 U-Bend 부위 간격 과다
 - 재열기 동체측 압력강하값 과소(설계 12Psi, 운전값 7~9Psi)→각종 틈새 팽창에 의한 증기 By-Pass 증거임
 - 저압터빈 유입 증기의 과열도 저하 및 습분량 증가
 - 동익 및 고정익 등 주요부품 침식 과다
 - 터빈 주요부위에 응력부식균열(SCC) 발생

발생

- 개선방안
 - 재열기 형식 변경 2-Pass → 4-Pass
 - 재열기 튜브내에서 가열증기 열교환 횟수 증가(2회 → 4회)
 - 응축수 과냉각도 최소화
 - 응축수 배수계통 동요현상 방지로 계통 안정운전
 - 과잉증기량 최적화
 - 스테인레스 재질의 고밀도 핀형 튜브 채택

- 튜브 입구측에 다공관을 설치하여 각 튜브별로 열부하에 따른 가열 증기량 조절
 - 재열기 하부 튜브내 응축수 배수기능 강화

→재열기 상하 튜브간 열팽창량 균일화로 튜브 안전성 증가

- 증기 우회누설(By-Pass) 방지장치 설치
 - 튜브와 튜브보호관 사이에 증기누설 최소화 장치 설치
 - 가요식(Flexible)의 튜브보호관 (Shroud Plate)설치

(3) MSR 운전방법 변경 검토

- 문제점
 - MSR운전 시점이 너무 빨라 터빈 회전자의 급격한 열팽창 우려
 - MSR 가열비율에 따라 터빈진동이 민감하게 변화하여 터빈운전 난이
- 개선방안

- 운전방법 개선

- 1단재열기 운전방법 : 기존과 동일(터빈에 주증기 공급시 고압터빈 3단추기가 1단재열기로 동시에 공급)
- 2단재열기 운전방법 : 급격한 가열에 의한 터빈 열팽창 문제점을 해소하기 위해 가열용밸브, 기동밸브 및 증기조절 밸브 운전시점 변경
- 운전방법 변경내용

밸브명	기존절차	변경후절차
가열용 밸브 (HV19)	터빈속도)1750 RPM	터빈부하 ≥ 10%
기동용배관 차단밸브 (CT-HV32)	터빈속도)1750 RPM	터빈부하 ≥ 10%
기동운전밸브 (HV33)	재열증기 ≥ 260℃	터빈부하 ≥ 35%
증기조절밸브 (TV17)	터빈부하 75MWe	터빈부하 ≥ 35%
증기조절차단밸브 (HV31)	터빈부하 75MWe	터빈부하 ≥ 35%
2단재열기 배기유로전환 (복수기→고압급수가열기)	터빈부하 570MWe	재열증기 ≥ 400°F

MSR 개선방향 종합

- 동체(Shell) : 계속 사용
- 습분분리장치
 - 이중포집장치의 세브론베인 선정
 - 스테인레스강 사용
 - 전단 습분분리장치 사용으로 주 습분분리기 부하분담 및 습분분리 효율 향상
- 재열기
 - 재열기 형식변경(2Pass → 4Pass 형식)
 - 압력강하 최소화 설계
 - 응축수 과냉각도 최소화 및 열전달 최대화
 - 튜브 재질변경(탄소강 → 스테인레스강)
 - 2단재열기 운전시점 변경(부하 10%→35%)

다. 신규 MSR 설치에 따른 안전성 검토

(1) 증기유동에 의한 재열기 튜브 진동특성 검토

- 유체흐름 진동 및 튜브 만곡에 의한 튜브 손상 가능성 검토 필요
⇒ 검토결과 과다 증기유량에서도 안전함을 확인.

(2) MSR 내부부품 응력해석

- 내부부품의 진동, 열낙차, 관성하중에 대한 구조해석 필요
⇒ 검토결과 고유진동수와 열응력의 응력 조건에서 안전함을 확인

(3) 습분분리장치 모델시험

- 유량분배장치(Slot 및 다공판) 성능 및 세

브론베인 통과전의 전단 습분분리 성능(Pre-Separation) 확인 필요

⇒ 시험결과 균일 유량흐름 확인(허용범위 평균유속의 0.8~1.2배, 실측값 0.9~1.2)

⇒ 다공판 구멍 형상의 최적조건 취득 및 전단 습분분리율이 31.5%임을 확인

(4) 세브론베인 진동시험

• 증기흐름으로 인한 세브론베인 진동에 의한 위험성 확인 필요

⇒ 과다유량 상태에서 베인변위가 고유진동수의 최대값 이내임을 확인

(5) 4-PASS 배관에 대한 설계 적합성 검토

• 기존 MSR (2-Pass) 과잉증기 배기용으로 사용되던 배관을 4-Pass 배기관으로 사용함에 따라 배관의 용량, 응력, 하중등 제반사항의 적합성 검토 필요

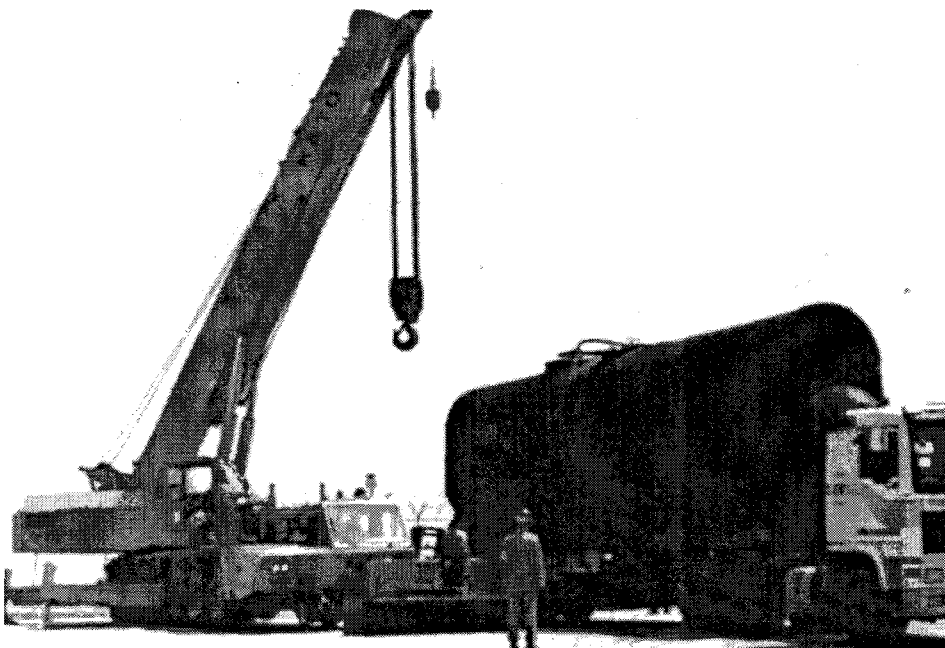


사진 1. 구형 MSR 내장품 취외 운반

⇒검토결과 기존 2-Pass 배관의 용량이 4-Pass 용으로 적합함을 확인함

(6) 기타 검토사항

- MSR 형식 개선에 따른 열역학적 검토 (Thermal design review)
- 응력해석 및 열팽창 계산(Stress analysis & Diff. thermal Expansion calculation)
- 증기공급 및 배수계통 검토(Steam supply & Drain sys. review)

라. 공사준비 및 시행

(1) 공사계약 및 규모

- 설치공사비 : 720,000천원
- 공사기간 : '95.8.~'95.11
- 인력투입 : 연3,000명(50명×60일)
- 설치기기 중량 : 280ton(동체 100ton 불

포함)

- 사용용접봉 : 6,000kg

(2) 공사전 준비

- 터빈건물 크레인 1대 추가 설치
- 주기기 조기 입고 및 사전점검 철저
- 중량물 부품 이동에 대비, 도로지반 안전성 검토 용역
- 설치대상부품 사전 배치계획 수립(박스수량 : 64박스) 및 시행
- 공사준비 계획 수립 및 시행 : 용접기 확보, 인력수급, 용접사 자격부여, 작업계획 수립
- 공사관리 감독조직 구성 : 한전감독(2명)+제작사(4명)+한전기공(4명)
- 공사절차서, 용접절차서양서(WPS)개발, 용접사 자격부여

(3) 공사관리

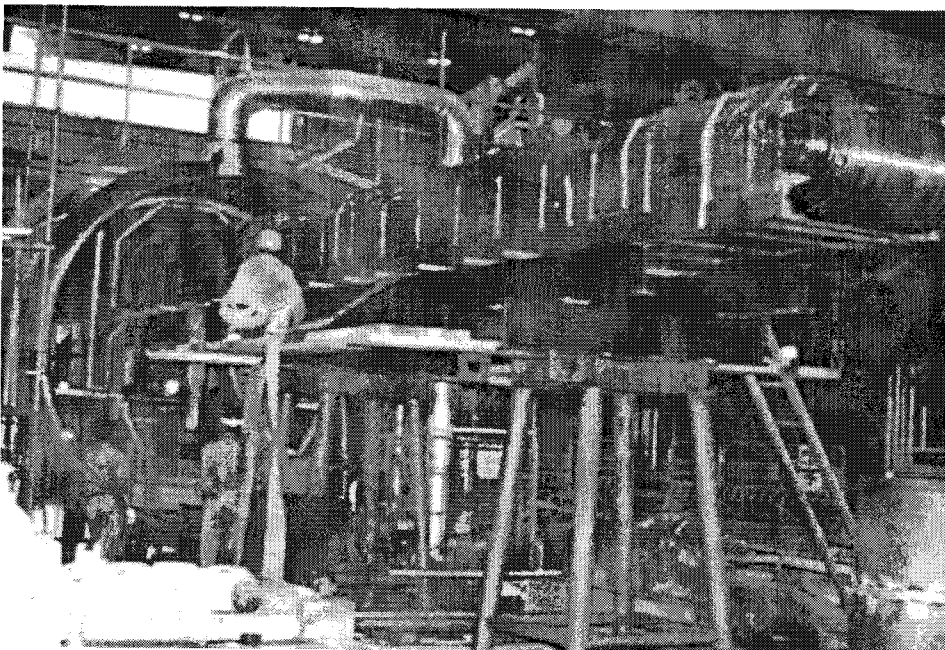


사진 2. 신형 MSR 재열기 설치

- 매일 작업 착수전 준비회의(한전감독자, 기술지원인력, 시공회사)
- 매일 작업후 설계도와 일치 여부 확인(감독자, 외국인 기술자)
- 전체 용접부위에 대한 비파괴검사 실시 (PT, RT)
- 작업절차 준수여부, 품질규정 준수여부등 사전확인으로 공사품질 확보

마. 성능확인 시험

(1) 목적

- MSR 내장품 교체에 따른 발전소 성능향상 및 계통안정도 평가
- 1,2단 재열기 과잉증기 유량 최적조정

(2) 성능시험 결과

- 발전기 출력 13MWe 증가, 발전소 순효율 0.474% 증가
- 발전소 건설후 시행한 인수성능시험 수준의 출력 회복

변수명	교체전	교체후	비고
발전기 출력(MWe)	974.84	987.61	13MWe증가
발전소 순효율(%)	34.993%	35.467	0.474%증가
습분분리효율(%)	85~87%	100	
재열기 종단온도차 (TTD, °F)	31.7°F	9.25	
재열기 압력강하(Psig)	10.2psig	7.25	
재열기 과열도(Btu/lb)	74.06	87.3	
2단재열기 응축수 과냉각도(°F)	-	3.7~10.4	

(3) 계통안정도 평가결과

(가) 재열기 배수배기계통 동요(Hunting)현상 방지

- 개선전 재열기 과잉증기량의 부적정, 응축수 과냉각 과다로 재열기 배수계통의 동요

가 심하였으나,

- 재열기 형식을 교체하고 과잉증기량을 최적 조정하여 과냉각도를 최소화하여 배수계통 안정화를 기함

(나) 저압터빈 유입 증기조건 개선

- 증기 과열도 증가로 터빈내 습분량 감소로 터빈부품 침식/부식 방지
- 터빈유입 주증기 온도증가로 터빈 효율 증가
- 증기조건(온도, 습분)개선으로 터빈진동 감소
- 터빈내 습분 감소로 응력부식균열(SCC) 요인을 제거하여 터빈수명연장

4. 절감효과 및 투자비

가. 에너지 절감효과

(1) 실증절감금액

- 발전기 출력증가에 의한 절감금액 : 347백만원
- 실증기간 : 53일('95.11.9~'95.12.31)

(2) '96년 예상절감금액

- 발전량 증가 : 연간 113,880MWh

- 절감금액 : 2,393백만원

나. 간접효과

- 설비에 대한 운전불신감 해소
 - 재열기 응축수 배수계통의 동요(Hunting) 현상 해소로 관련계통 안정적 운전 가능
 - 과다 침식, 부식부위 누설 가능성 배제
- 터빈 발전기 운전조건 개선

- 터빈 유입증기 조건개선(온도증가, 습분 저하, 과열도증가, 증기유량 균일화)로 터빈운전상태 양호

- 증기온도, 과열도 증가로 터빈 열효율 향상 → 출력 증가

- 증기 과열도 증가로 터빈부품 침식, 응력 부식균열(SCC)최소화

■구형 MSR 재열기 튜브 대형손상방지

- 가압경수로형 발전소 MSR 재열기 탄소강 튜브의 한계수명은 약 10년 정도로 보고되고 있으며, 현장 점검시에도 튜브싹트 근접 부위의 튜브상태가 심하게 부식되어 있는 것을 발견함.

- 정상운전중 튜브 파열시 그 규모가 급격히 확대될 가능성이 있었으며, 이 경우 출력감발 운전 또는 장기간 발전중지가 불가피 하며,

- 실제로 외국발전소(PRAIRIE ISLAND)에서도 이와 유사한 사례가 발생하여 발전 중지후 재열기를 긴급 발주, 교체함.

■경비 절감액

- 터빈부품검사 및 교체비 : 775백만원
 - 검사비 : 250만원
 - 교체비 : 525백만원
- MSR 수리비 : 200백만원

다. 투자비 5,830백만원

- 투자비 : 5,830백만원
- 투자비 회수기간 : 2.1년

5. 향후 대책

가. 고리4호기에 확대 적용

- 시기 : '96.4호기 9차 O/H 기간중
- 주기기 구매 : 기계약
- 교체범위 : 3호기와 동일
 - 동체 (Shell)을 제외한 MSR 내장품 전체

나. 4-Pass 배관 과잉증기량 최적 조정

- 주기적인 과잉증기량 최적조정으로 증기 손실 방지

6. 절감효과 산출근거

가. 실증절감금액

- 발전 기간 : 53일(계통병입일 '95.11.9~12.31)

- 추가전력 생산 : $13\text{MWh} \times 53\text{일} \times 24\text{hr} = 16,536\text{MWh}$

- 절감액 : $16,536\text{MWh} \times 10^3\text{KWh} \times (24.71 - 3.69) = 347,586\text{천원}$

나. 예상절감금액

(1) 발전량 증가에 의한 절감액

- 발전량 증가 : 13MWe기준

- 연간 추가전력 생산 : $13\text{MWe} \times 365 \times 24\text{hr} = 113,880\text{MWh}$

- 절감액

- 발전량 × (화력발전단가-원자력발전단가) = $113,880\text{MWh} \times 10^3\text{KWh} \times (24.71 - 3.69) = 2,393,757\text{천원}$

(2) 설비 운전환경 개선으로 인한 절감액

(가) 터빈운전조건 향상으로 인한 절감액: 775,000천원

- 터빈부품 검사, 교체비용

- 비파괴 검사 용역비 : 연간 호기당 250,000천원

- 로타교체 비용 : $70\text{억/개} \times 3\text{대} \div 40\text{년} = 525,000\text{천원}$

(나) MSR 수리비 20,000천원

- 인건비 = $10\text{명} \times 20\text{일} \times 50,000\text{원} = 10,000\text{천원}$

- 자재비(가스켓, 용접봉, 철판등) 1식 10,000천원 